

(15) AEによる岩石の破壊機構と周波数解析

摂南大学 工学部 道広一利
 大阪大林組技術研究所 ○畑 浩二
 藤原紀夫
 吉岡尚也

1. はじめに

地下発電所のような大規模地下空洞を構築する場合、空洞の安定性を確保することはきわめて重要なことである。通常、空洞の力学的挙動を把握するためにインタクトなロックの一軸圧縮試験や、内空変位計測をはじめとする種々の現場計測が行なわれているが、岩盤掘削に伴い局所的な応力集中が原因で発生する山はねなどの岩盤破壊を事前に予知し、災害を未然に防ぐことはなかなか難しい。仮に、岩盤の不安定領域の生成過程を何らかの方法により事前に予知することが可能であれば、大規模地下空洞をはじめとする岩盤内構造物の安定性を検討するうえで非常に意義あることと考えられる。

岩石をはじめとする材料（例えば金属やコンクリートなど）の内部にマイクロクラックの発生や成長が生じた場合、主要な破壊に至る以前の段階からアコースティック・エミッション（以下AEと略す）が発生することはよく知られている。^{1)・2)} 先駆的には、脆性岩石に一軸圧縮応力を作用させることによって、载荷初期にはかなりのAEが発生するが、その後载荷とともにAE発生数は減少する傾向にあり、破壊の起こる直前に再びAE発生数は急増することを明らかにしたMogi³⁾の研究がある。楠瀬ら⁴⁾は、一軸圧縮载荷中のAE発生位置に着目することにより、岩石の破壊過程を明らかにすることを試みている。また、著者らは、AEを岩石の一軸圧縮载荷試験に適用して、破壊に影響を及ぼす新たなマイクロクラックが発生し始める応力レベルを予知できることの可能性を示した。⁵⁾

本研究では、花崗岩をはじめとする8種類の岩石供試体に破壊に至る単調载荷を行ない、供試体内部から発生するAEを観察した。本文は特に、粒子構造の相違におけるAE発生特性、振幅分布特性ならびに卓越周波数の移動特性を中心に論じたものであり、これらの結果から、岩盤内構造物の力学的安定性を検討するうえでの有効な手掛かりを与えようと試みたものである。

2. 実験装置および実験方法

実験に使用した岩石は稲田花崗岩、阿木川花崗斑岩、水上流紋岩、愛岐砂岩、道場凝灰岩、宇治粘板岩、藤岡結晶片岩そしてイタリア大理石の8種類である。供試体形状は直径30mm、高さ60mmの円柱体で、両端面の平面度は1/20mm以内とした。これら岩石の物性を表-1に示す。整形した供試体は、アムスラー型万能試験機を用いて14.7MPa/minの载荷速度で単調载荷を行った。

今回の実験に使用したAE計測システムの概略を図-1に示す。供試体側面中央部の1ヶ所に鋼製アタッチメントを介してAEセンサを取り付けた。AEセンサはジルコン酸チタン酸鉛磁器振動子(PZT)を用いたもので、140kHzの共振周波数を有した不平衡型(NF製 AE-901S)と100kHz~1MHzの周波数特性を有した非共振型(NF製 AE-900S-WB)の2種類である。AE信号波形を解析した実験(稲田花崗岩と愛岐砂岩)にのみ後者のセンサを使用した。AEセンサで検出されたAE波は、プリアンプ(NF製 AE-912)で40dB増幅した。増幅されたAE信号は、さらにディスクリミネータ(NF製 AE-922)で増幅され、あらかじめ設定したしきい値とバンドパスフィルタにより弁別された後、デュアルカウンタ(NF製 AE-932)でAE発生数を計測した。また、ディスクリミネータからアンブリチュードディテクタ(NF製 AE-971A)を介してデュアルカウンタに接続するダイアグラムにより、1イベント中の最大振幅値を計測した。さらに、デジタルストレージスコープ(岩通製 DS-6121A)を使用して0.5 μ secのサンプリング間隔(Nyquist周波数は1MHz)でAE信号波形を記録した。軸応力と

表-1 岩石物性

	Specific gravity γ (kN/cm ³)	Compressive strength σ (MPa)
Inada granite	25.8	131.7
Akikawa granite-porphry	26.3	82.9
Minakami rhyolite	26.4	119.1
Aiki sand-stone	25.9	210.3
Dojo tuff	24.3	83.6
Uji clay-slate	26.9	94.6
Fujioka crystal-schist	28.9	71.2
Italy marble	26.5	74.0

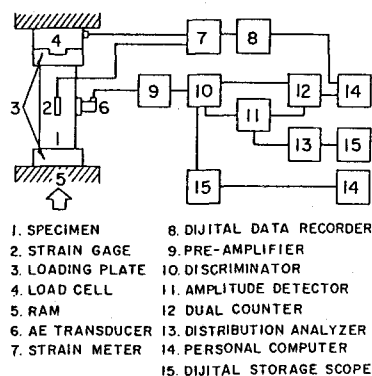


図-1 AE計測システム概略

軸ひずみはストレインメータ（東京測器製 TDS-301）を介してデジタルデータレコーダ（東京測器製 RM-1HA）に記録した。これら計測した諸量は、GP-IB を通してパーソナルコンピュータ（日電製 PC-9800）で処理・解析した。

3. 結果と考察

3-1. AE発生パターンとm値の相関関係

A E発生様式を調べた楠瀬ら⁴⁾の研究や波動エネルギーと卓越周期との関係を調べた飯尾⁶⁾の研究から、通常の岩石から発生するA Eは自然地震の相似則を満たしていることが明らかにされている。そこで、自然地震の分野で対象とした石本-飯田の式 ($NA^m=k$)⁷⁾中の定数mを適用し、一軸圧縮載荷時において作用した軸ひずみと、発生したA Eの累積数およびm値との関係を調べた。ここで、m値とは地震総数(N)と最大振幅値(A)との関係を両対数グラフ上に点プロットし、直線近似したときの勾配であり、破壊の程度を表わす指標と考えられている。軸ひずみとA E累積数およびm値は比較の便宜を図るため、それぞれの最大値で除して正規化した。m値は60~80dBの振幅について1秒毎の累積で計算した。

図-2、図-3および図-4は、それぞれ稲田花崗岩と阿木川花崗斑岩および水上流紋岩の測定例である。これらの結果では、破壊の約80%程度を境にしてA Eは急激に増加していることが認められた。m値については、A E累積数の急変点に対応してピークが存在し、A Eの急激な増加とともに小さくなる傾向を示した。この種の岩石は、成因的に見れば石英とカリ長石および有色鉱物など強度特性の異なった粒子を主成分としている。そのため、破壊近傍になると粒界でのクラック発生ならびに進展が顕著となり、大振幅のA E波が卓越するものと考えられる。

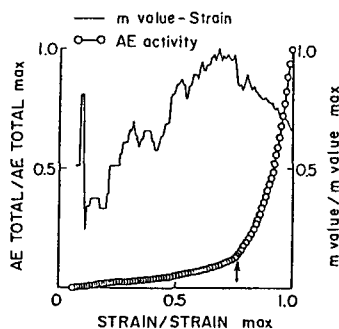


図-2 稲田花崗岩測定例

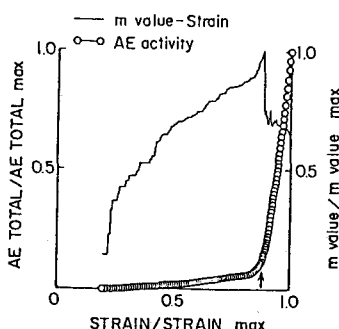


図-3 阿木川花崗斑岩測定例

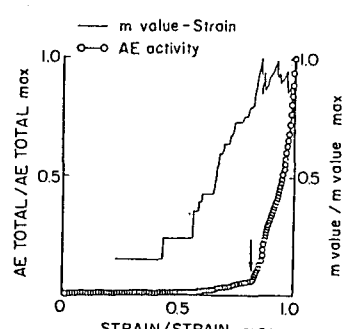


図-4 水上流紋岩測定例

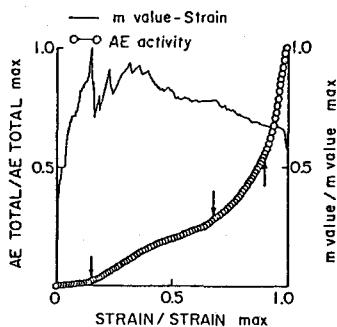


図-5 愛岐砂岩測定例

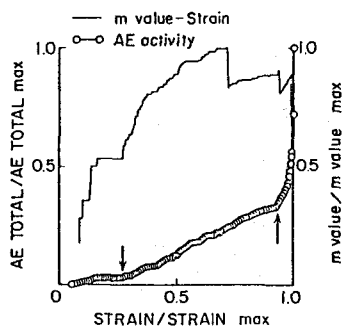


図-6 道場凝灰岩測定例

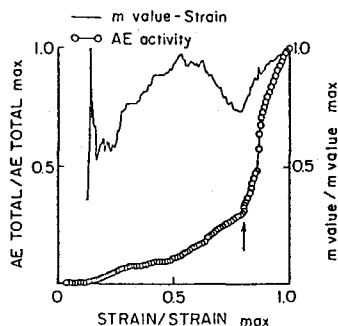


図-7 宇治粘板岩測定例

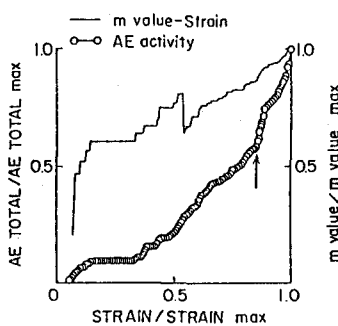


図-8 藤岡結晶片岩測定例

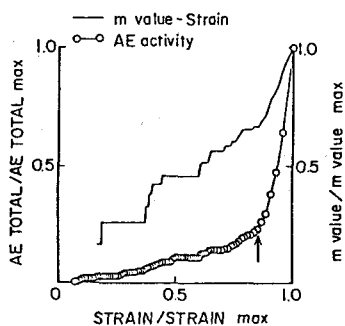


図-9 イタリア大理石測定例

図-5と図-6は、それぞれ愛岐砂岩と道場凝灰岩の測定例である。これらの結果では、AE累積数には複数の変曲点が点在しており、AE累積数の変曲点とm値のピーク点とは必ずしも一致していないことが認められた。むしろ、破壊のごく近傍（破壊の約97%程度）においてm値は急激に小さくなる傾向を示した。この種の岩石は、石基の中に石英や有色鉱物などが比較的粗く分布している。そのため、破壊のごく近傍で粒界でのクラック発生ならびに進展が顕著となり、大振幅のAE波が急激に卓越するものと考えられる。

図-7、図-8および図-9は、それぞれ宇治粘板岩と藤岡結晶片岩およびイタリア大理石の測定例である。これらの結果では、破壊の約80%程度でAE累積数には変曲点が存在した。しかし、m値は破壊近傍になっても小さくなる傾向は見られなかった。宇治粘板岩と藤岡結晶片岩は片状構造をなしており、粒界でのクラック発生は生じにくく、大振幅のAE波が発生しないまま破壊に至るものと考えられる。一方、イタリア大理石は方解石の単結晶であるため、稲田花崗岩のように異なった強度特性の粒子間における破壊ではないことから、大振幅のAE波が発生しにくいものと考えられる。

3-2. 周波数解析

一軸圧縮荷重中に発生したAE信号波形を計測し、周波数解析を行うことにより卓越周波数がどのような変化を示すものかを調べた。実験は、稲田花崗岩と愛岐砂岩についてのみ行なった。図-10は稲田花崗岩の測定例である。図中(a)は計測されたAE信号波形の一例であり、(b)は(a)の周波数解析結果である。(c)はそれぞれのAE信号波形の周波数解析結果から求められる卓越周波数（ピーク値）と軸応力の関係を示す。ただし、軸応力は破壊時の最大軸応力で除して正規化した。図-11は愛岐砂岩の測定例である。図中(a)、(b)、(c)は図-10の場合と同じである。両実験結果とも、AE信号波は急激な立ち上りを示すとともに、持続時間はせ

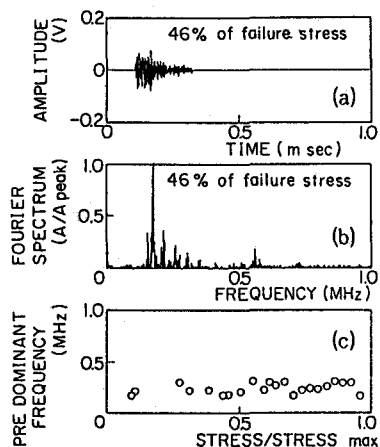


図-10 (a), (b), (c) 稲田花崗岩測定例

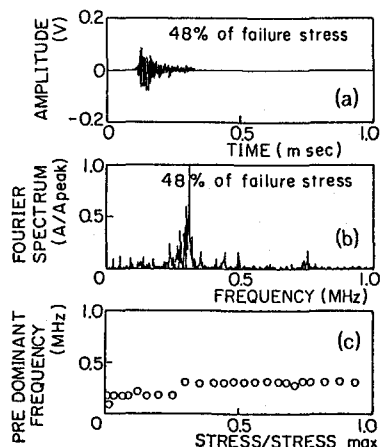


図-11 (a), (b), (c) 愛岐砂岩測定例

いぜい 0.3~0.5msec 程度で非常に減衰の速いものであった。ただし、破壊の近傍においては、これらの波形が重なり合ったり連続的なものが多く、1 msecを超えるものも記録された。周波数解析の結果、稲田花崗岩では破壊の約50%程度を境にして卓越周波数の変化することが明らかになった。一方、愛岐砂岩の場合は、破壊の約30%程度を境にして卓越周波数の変化することが明らかになった。

4. おわりに

8岩種について一軸圧縮载荷中のAEを計測した結果、以下のことが判明した。

- (1) 強度特性の異なる結晶粒子から成る岩石（稲田花崗岩、阿木川花崗斑岩、水上流紋岩）では、破壊の約80%程度のところでAE累積数に変曲点が存在し、その近傍でm値はピークを持つことがわかった。
- (2) 石基の中に結晶粒子が粗く配している岩石（愛岐砂岩、道場凝灰岩）では、AE累積数には複数の変曲点が存在するが、m値の変曲点とは必ずしも一致しないことがわかった。また、m値は破壊のごく近傍で急激に小さくなることがわかった。
- (3) 片状構造や単一粒子から成る岩石（宇治粘板岩、藤岡結晶片岩、イタリア大理石）では、破壊の約80%程度のところでAE累積数に変曲点は存在するが、m値は载荷に伴って増加することがわかった。
- (4) AE信号波形の形状は、稲田花崗岩と愛岐砂岩とは大きな相違は見られなかった。ただし、周波数解析の結果、稲田花崗岩の場合は破壊の約50%程度で卓越周波数は変化するが、愛岐砂岩の場合は破壊の約30%程度で卓越周波数の変化することがわかった。

以上の結果から、データ数としてはまだまだ多くないが、粒子構造の相違によってAE発生パターンとm値分布および卓越周波数分布の異なることがわかった。

参考文献

- 1) 尾上 編 “アコースティック・エミッションの基礎と応用”，コロナ社 1976
- 2) G.M. Boyce et. al. “Acoustic Emission Signatures of Various Rock Types in Unconfined Compression”, ASTM STP-750 1981 pp. 142~154
- 3) K. Mogi “Study of Elastic Shocks Caused by the Fracture of Heterogeneous Materials and its Relations to Earthquake Phenomena”, Bulletin of the Earthquake Research Institute (Tokyo University) Vol. 40 1962 pp. 125~173
- 4) 楠瀬 他 “岩石の一軸圧縮試験におけるAE発生機構”，地震 第2輯 第34巻 1981 pp. 241~250
- 5) 道広 他 “一軸応力下におけるAE発生パターン”，第22回土質工学研究発表会 1987 pp. 945~946
- 6) 飯尾 “破壊のスケールング—自然地震からAEまで—”，地震 第2輯 第35巻 1982 pp. 183~193
- 7) 石本 他 “微動計による地震観測（一）”，震研彙報 17 1938 pp. 443~478

(15) Study on Failure Mechanism and Frequency Analysis of Various Rocks from Acoustic Emission

Kazutoshi MICHIIRO

Lecturer, Setunan University

Koji HATA, Toshio FUJIWARA and Hisaya YOSHIOKA

Technical Research Institute, Ohbayashi Corporation

ABSTRACT

When constructing a large cavern such as for an underground powerhouse ---for example, the underground cavern size at Waldeck II Power Station is $33.5 \times 50 \times 105\text{m}$ --- it is of extreme importance for stability of the cavern to be assured. However, it is not an easy matter to prevent accidents by predicting failure of a rock mass due, for example, to rock burst occurring because of local stress concentrations produced when excavation of the rock mass is done.

When external forces are made to act on materials such as rock, very small failure sounds called Acoustic Emission (abbreviated as AE) are produced from a stage ahead of the principal failure. The study reported here was made in an attempt to find an effective means of examining the mechanical stability of structures in rock masses taking advantage of AE.

Unconfined compression test was applied to eight varieties of rock beginning with granite and the AE levels were measured. It was found from the results of examining AE activity and maximum amplitude during a single event that there can be several types of both AE activity mode and m-value distribution depending on the particle structure making up the rock. Furthermore, from the results of analysis on AE signal waves measured, it was found that the dominant frequency increases with load. As a result of the above, it was learned that when attempting to predict failures of rocks and rock masses utilizing AE, it will be necessary to keep in mind that AE activity modes will differ depending on the variety of rock.